

光子晶体耦合腔光波导慢光结构特性研究*

李长红¹, 田慧平², 鲁辉², 纪越峰²

(1 青岛大学 自动化工程学院, 山东 青岛 266000)

(2 北京邮电大学 光通信与光波技术教育部重点实验室, 北京 100876)

摘要:研究了用于光缓存的光子晶体耦合腔光波导的结构对慢光传输特性的影响. 详细讨论了微腔间距关于波导禁带、导模带宽、导模传输群速度的具体关系. 计算发现, 随着微腔之间距离的增加导模显著平坦化, 群速度急剧减小. 当相邻微腔之间距离为 7 个晶格常数时, 获得了小于 $2 \times 10^{-4}c$ 的超小群速度. 通过长度为 $13.23 \mu\text{m}$ 的 7×7 超胞构成的光子晶体耦合腔光波导, 产生的最大光延迟超过了 400 ps, 这比相同长度传统光波导产生光延迟大四个数量级.

关键词:光子晶体; 微腔; 波导; 慢光

中图分类号: TN2

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2009)12-3214-6

0 引言

自近年来, 作为实现下一代全光网络的核心器件之一, 全光缓存器件^[1,2] 已经成为光通信领域研究的热点. 网络节点的吞吐量、丢包率、通道竞争需要用到光缓存; 为了实现完全光信息处理的全光路由, 彻底打破光纤通信系统的“电子瓶颈”, 光缓存器也是必不可少关键部件. 另外, 光缓存器还可用于全光信号处理、射频光子学应用等方面.

为了解决全光缓存和全光信息处理, 具有超小群速度的慢光研究受到人们广泛关注. 最近十年, 已经发现有多种机制实现慢光传输, 例如, 电磁诱导透明 (Electromagnetic Induced Transparency, EIT)^[3] 联合布居振荡 (Coherent Population Oscillations, CPO)^[4], 受激布里渊散射 (Stimulated Brillouin Scattering Process, SBS)^[5], 和光子晶体 (Photonic Crystal, PC)^[6,7] 等等. 其中, 光子晶体慢光, 由于其紧凑的微小结构, 独特的光子控制特性和室温运行等特点, 在全光通信系统和全光信息处理的应用中具有无可比拟的优势^[8-10].

已有光子晶体慢光研究多是通过二维光子晶体线缺陷波导 (Photonic Crystal line defects waveguide, PCW)^[11-12] 或者耦合腔波导 (Photonics Crystal Coupled Resonator Optical Waveguide, PC-CROW)^[13-16] 来实现慢光. 线缺陷波导中传输的光

波群速度仍然较大, 所以慢光效应较弱, 而对于 CROW, 其中的光传输是通过相邻微腔之间的腔模的弱耦合实现, 可以大幅减小传输光的群速度, 从而实现很强的慢光效应. 对于一维光子晶体耦合腔光波导的慢光特性^[17] 和色散特性^[18] 已有理论研究.

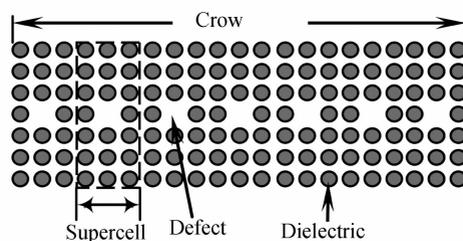
本文基于对普通二维 PC-CROW 慢光特性的分析, 研究结构参数对传输光群速度的影响, 并对其结构进行调整, 通过微腔间距的调整, 得到群速度小于 $2 \times 10^{-4}c$ 的慢光, 在 $13.23 \mu\text{m}$ 的 PC-CROW 中的光延迟比同样长度传统光波导光延迟大四个数量级.

1 结构设计与分析方法

本文研究的 PC-CROW 结构如图 1(a), 沿着圆柱形介质柱构成四方晶格结构光子晶体的 Γ -X 方向周期性地移除介质柱, 形成微腔链, 构成耦合腔光波导. 其中, a 和 r 分别是光子晶体基本结构的晶格常数和介质柱半径, 耦合腔光波导由四个参数定义: N 为形成波导的缺陷个数, 即超胞数目; n 为相邻缺陷微腔之间的介质柱数目, 确定了相邻缺陷微腔之间的距离; Δ 为形成微腔的超胞尺寸; L 为 CROW 的长度. 各个结构参数之间的关系

$$\Delta = (n+1)a, L = N(n+1)a = N\Delta \quad (1)$$

图 1(a) 中 PC-CROW 参数为 $N=7, n=2, \Delta=$



(a) Typical PC-crow with square lattice

* 国家自然科学基金(60707001, 60711140087)、国家高技术研究发展计划(2009AA01Z214)、国家重点基础研究发展计划(2007CB310705)、教育部创新团队(IRT0609)和新世纪人才项目(NCET-07-0110)资助

Tel: 0532-85953711

Email: jiluch@126.com

收稿日期: 2008-12-05

修回日期: 2009-03-12

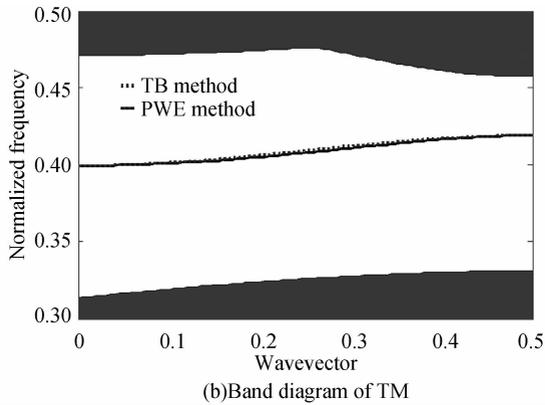


图1 具有四方晶格的 PC-CROW 结构和波导的 TM 模色散带
Fig.1 Schematic of a typical PC-CROW with square lattice and b Band diagram of TM guided mode in the proposed structure in (a)

3a. 图中虚线部分标出一个超胞单元,是 7×3 结构,移除中心介质柱形成微腔。

采用含有超胞二维平面波展开法^[19-20]分析 PC-CROW 的 TM 模色散关系 $\omega(k)$,基于该色散关系计算波导的导模群速度 v_g ,可以由式(2)计算^[21]

$$v_g = \frac{d\omega}{dk} = \frac{c}{n_g} \quad (2)$$

式中, k 是沿波导方向的波矢, c 是真空中光速, n_g 是波导的群折射率. 通过长度为 L 的波导,产生光延迟 τ 可以用式(3)表示

$$\tau = \frac{L}{v_g} = \frac{N\Delta}{v_g} \quad (3)$$

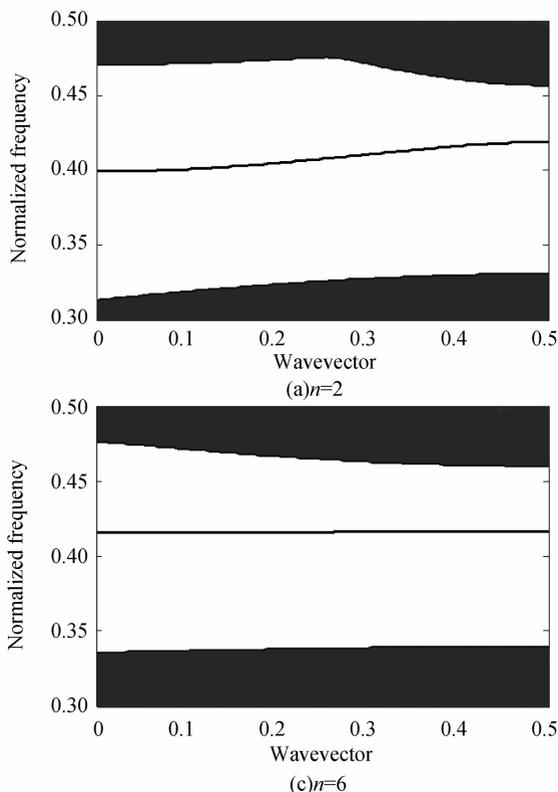


图2 不同微腔距离的 PC-CROW 的 TM 模色散带

Fig.2 Dispersion relation of TM mode, of PC-CROWs with different structure

图1(b)为采用该方法计算所得 PC-CROW 的 TM 色散曲线(实线曲线),计算结果显示:对于 TM 模,在频率范围 $0.33072 \sim 0.45702$ (单位: $\omega a / 2\pi c$) 是传输禁带,禁带中存在一个平坦的单一导模,处于频率 $0.399 \sim 0.419$ 范围,导模带宽为 0.01968 ,以波长表示带宽为 69.81 nm ,平坦导模必然支持慢光传输.为了确认 PWE 在计算耦合腔光波导中的有效性,将 PWE 的计算结果与耦合理论常用的紧束缚法(Tight Binding, TB)^[13,22]对导模的分析结果(虚线曲线)进行了比较,结果显示,二者吻合得很好。

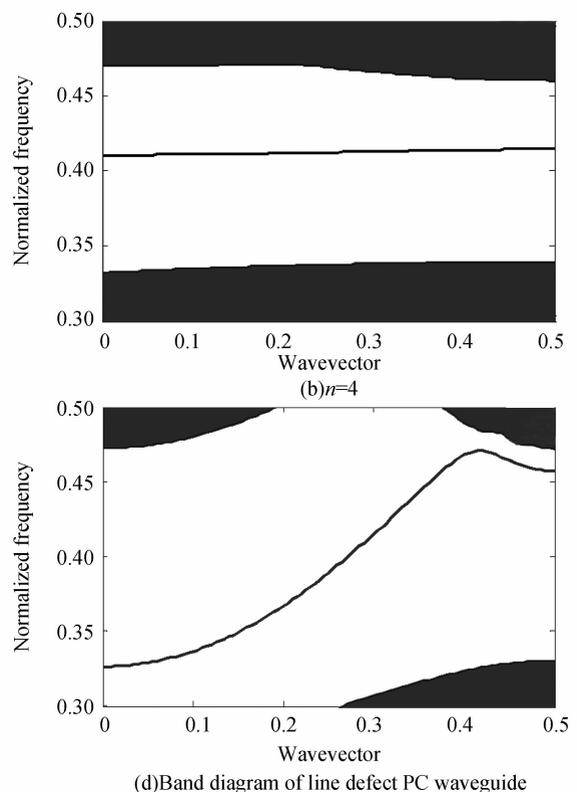
2 分析与讨论

为了得到更好的慢光传输特性,降低光的群速度,减小光延迟线和光缓存器的尺寸,同时提高存储能力,分析了 PC-CROW 的结构。

2.1 微腔间距离对导模色散曲线的影响

在分析中,PC-CROW 介质柱材料介电常数取 $\epsilon_a = 8.9$,背景材料为空气 $\epsilon_b = 1.0$,晶格常数取 $a = 630 \text{ nm}$,基本介质柱半径取 $r = 0.2a$ 。

对于微腔间距离分别取参数 $n = 2, 4, 6$,即超胞分别为 $7 \times 3, 7 \times 5, 7 \times 7$,计算了它们各自的色散关系.图2是三种情况下 TM 导模的带图,将它们与相同 PC 结构的线缺陷波导(可视为 7×1 超胞去掉中心介质柱依次排列构成)色散带图(图2(d))比较,



CROW 中禁带的单一导模非常平坦,并且随着腔间距离的增加,导模频带逐渐变窄.三种情况下导模所处的率范围分别为:0.399 36~0.419 04, 0.410 48~0.414 47 和 0.415 58~0.416 67,频率宽度分别为:0.019 68,0.003 99,0.001 09,而线缺陷波导的导模频宽为 0.144 19,与线缺陷光波导导模宽度相比,三个耦合腔光波导中导模宽度分别是前者宽度的 13.65%、2.77%和 0.76%,随着微腔距离的增加,导模带宽迅速变窄.计算发现,在微腔距离增加,即 n 增大时,导模平坦化越来越平坦,同时导模中心频率稍微向高频方向上移,而 CROW 的禁带置基本保持不变.

2.2 不同微腔距离下的群速度

利用公式(2),对导模色散曲线求取一阶微商,能够计算出 CROW 导模的群速度.图 3 画出了 $n=2,4,6$ 时导模群速度随频率的变化曲线,以及导模最大群速度随参数 n 的变化关系.图 3(a)、(b)、(c) 是各导模群速度 v_g 关于频率的变化曲线.群速度在导模中心附近达到最大值,在带边处, v_g 趋于零,这

一变化趋势与线缺陷波导中导模群速度变化规律相同.在三种情况下,CROW 中各个导模最大群速度 v_{gmax} 分别对应 $0.061c$ 、 $0.012c$ 和 $0.0033c$,是线缺陷波导中导模群速度最大值的 $1/9$ 、 $1/48$ 和 $1/173$.随着微腔之间距离的增加,群速度迅速下降,与 $n=2$ 相比,当 $n=4,6$ 时,最大群速度分别下将到 $n=2$ 时的 27%和 5.5%.图 3(d)是导模最大群速度 v_{gmax} 随着参数 n 的变化关系,当微腔距离增大时,导模群速度呈指数关系下降,当 n 超过 6 时 v_{gmax} 的变化减缓,而 n 超过 8 时,由于两个相邻耦合腔之间距离过大,光耦合作用被过度减弱,已经得不到稳定的慢光效应,因此,相比较而言, 7×7 超胞构成的 PC-CROW 是较理想的慢光结构.当 $n=6$ 时,带边处群速度 v_g 小于 $2 \times 10^{-4}c$,而在同样 PC 结构的线缺陷波导中,导模的最大群速度为 $0.5715c$,带边位置的最小群速度小于 $0.025c$,可以看出,PC-CROW 中的光传输速度比 PCW 中的光传输群速度小两个数量级.

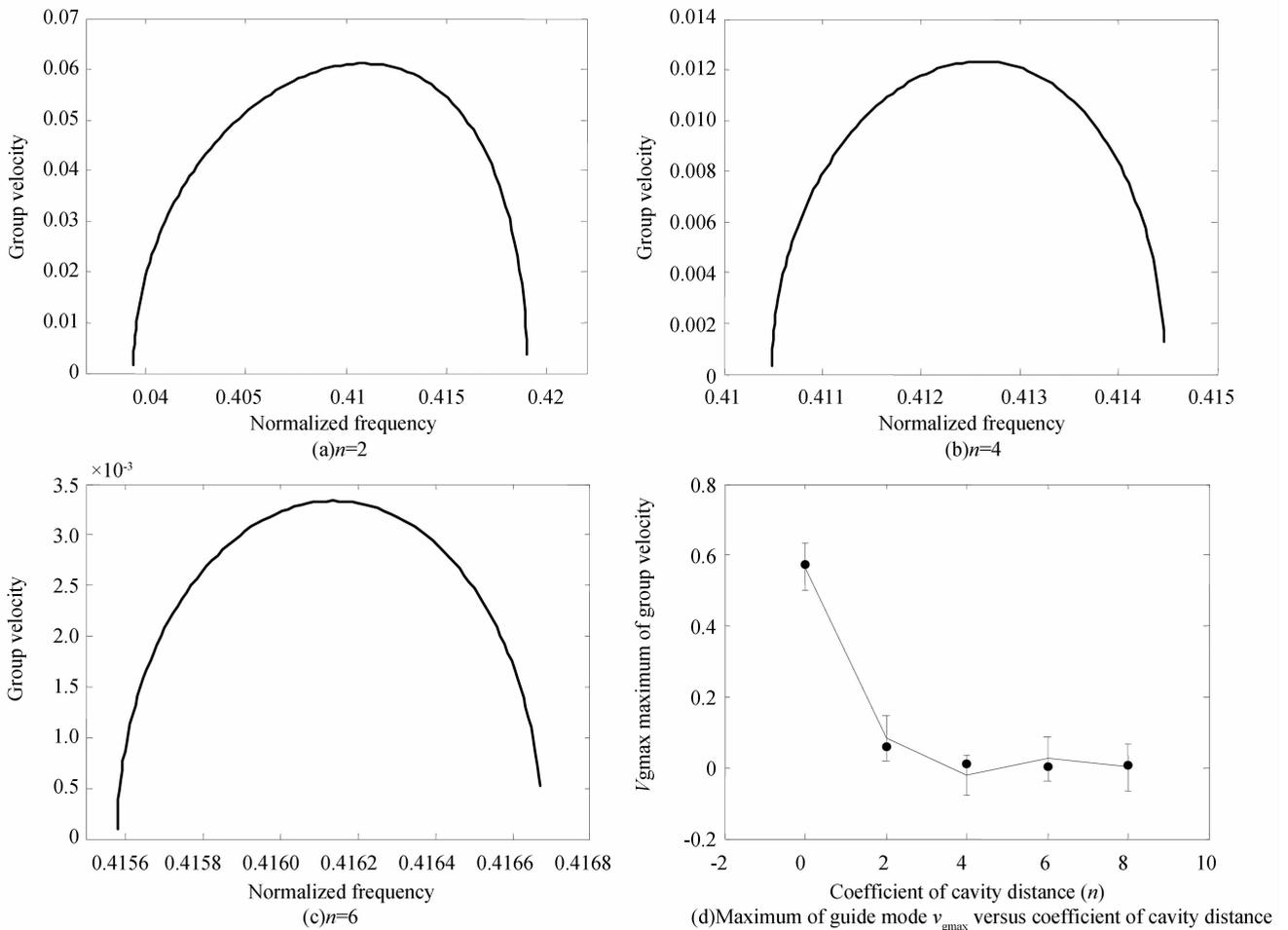


图 3 腔间距离不同的 PC-CROW 中导模群速度

Fig. 3 Group velocity of guided mode in different CROWs

由于 CROW 中的光传输是通过相邻腔模之间的弱耦合来实现的,则群速度随腔间距离增加而减小,这是因为微腔之间距离增加时,腔模耦合减弱,耦合因子减小,传输群速度也就随之变小.

2.3 不同腔间距离下的波导时延

根据以上得到的群速度和公式(3),分析通过相同长度的 CROW 时,三种结构波导产生的时延.取波导长度 $L=13.23 \mu\text{m}$ (21a),图 4(a)、(b)、(c)分别画出了时间延迟随导模频率的变化曲线.从图上可以看出,在带边附近,群速度时延 τ 增加很快,而在曲线底部,曲线比较平坦,时延随频率变化相对缓慢.图 4(a)显示,当 $n=2$ 时,在曲线底部,最小时延大约为 0.75 ps ,而在带边位置迅速增加,最大达到

29.6 ps .而当 $n=4$ 时,曲线底部时延为 3.58 ps ,带边时延超过 100 ps ,导模大部分频率范围时延在 $10\sim 25 \text{ ps}$ 之间.对于由腔距离 $n=6$ 的 7×7 超胞构成的 CROW,产生的最小时延是 13.23 ps ,而带边处的最大时延超过了 400 ps ,导模大部分频率范围内,时延在 $15\sim 40 \text{ ps}$ 之间.而在传统的光波导中(如 SiO_2 波导),传输相同距离产生的时延为 0.06615 ps ,是 7×7 超胞 PC-CROW 的最小时延的 $1/227$,比 CROW 的最大时延小三到四个数量级,这说明光子晶体 CROW 能够将光速显著降低,并且 CROW 的微腔间距的增大可以有效提高光延迟.是应用于光延迟和光缓存的优良可选技术.

3 PC-CROW 中光传输的数值模拟

为了验证 PC-CROW 中的光传输,用 FDTD 法模拟仿真了波导中的光波电场分量在波导中的场分布情况.图 5(a)、(b)和(c)分别画出了 7×3 、 7×5 和 7×7 超胞构成的 $n=2, 4, 6$ 波导中,频率分别为 $0.402, 0.412$ 和 0.416 的电场分布.场模分布情况可以说明微腔模式之间相互作用和光在 CROW 中的传输.图上显示,场能量被限制在各缺陷微腔内,光的传输是光子从一个微腔跳跃到下一个相邻的微腔.图 5(a)显示,当 $n=2$ 时,微腔内光场很强,传输到右侧最后一个微腔时,场强与左侧入射端微腔内限制场强基本相同;当 $n=4$ 时(图 5(b)),光传输到右侧最后一个微腔内,场强稍有减弱;而当 $n=6$ (图 5(c))时,微腔内的光场明显减弱;这可以解释为,随微腔距离的增加,腔模耦合减弱所致.正是这种减弱的腔模耦合降低了光传输的速度.

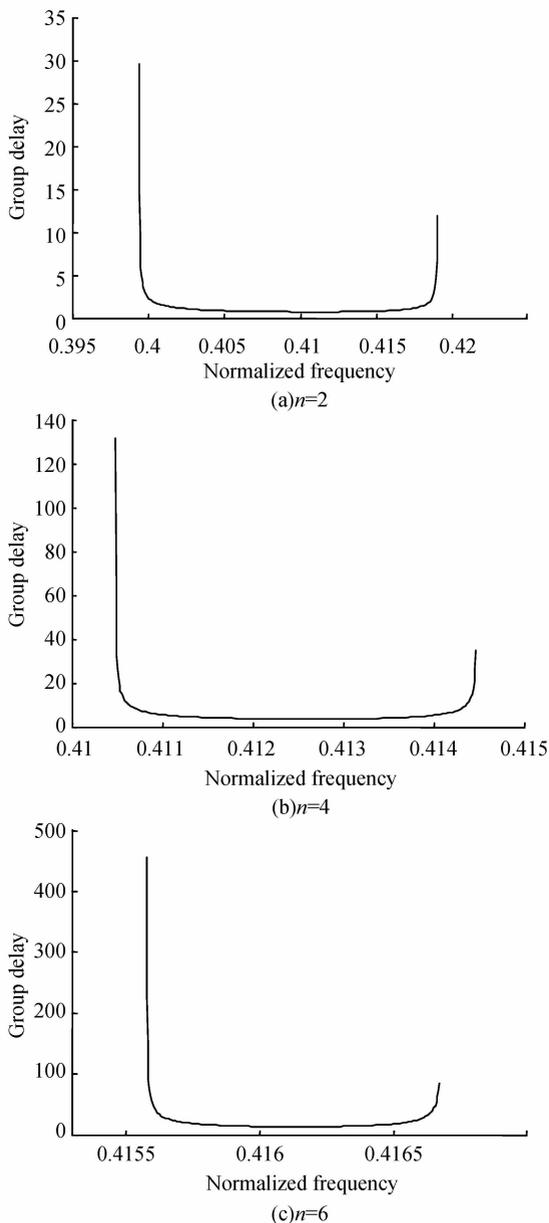
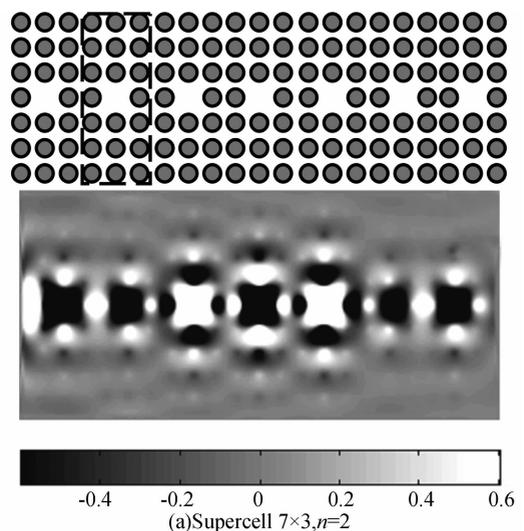


图 4 通过长度 $L=13.23 \mu\text{m}$ 的 CROW 时产生的时延
Fig. 4 Group delay of three different CROWs
with same length $L=13.23 \mu\text{m}$



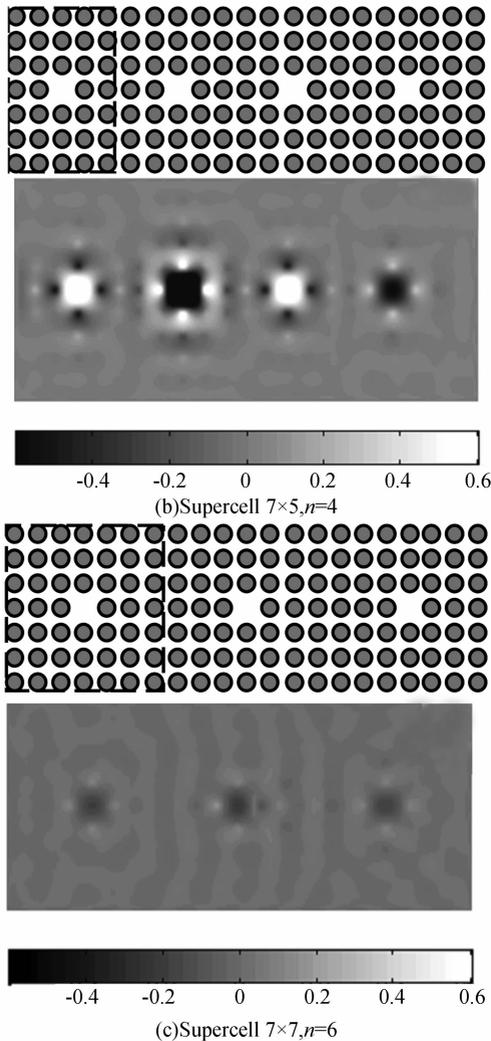


图5 FDTD 计算 CROW 光传输时的电场分布

Fig. 5 Schematics of CROW and corresponding electric field amplitude distributions calculated by FDTD

4 结论

在对 PC-CROW 慢光传输特性影响的研究中发现,波导中的慢光导模非常平坦,并且,随着微腔距离的增加,导模越来越平坦,相应的导模群速度,也随着微腔距离的增加迅速变慢,当 $n=6$ 时,最小群速度小于 $2 \times 10^{-4}c$,这比光子晶体线缺陷波导中的慢光传输速度小两个数量级.通过 $13.23 \mu\text{m}$ 的 PC-CROW,最大时延可以达到 400 ps.这比相同长度传统波导中产生的时延大三到四个数量级.最后,通过 CROW 中光传输的 FDTD 仿真模拟,确认,光传输速度随腔间距离增加而减小是由于腔模之间的耦合减弱所致.

参考文献

- [1] KU P C, CHANG-HASNAIN C J, CHUANG S L. Variable semiconductor all-optical buffer[M]. *Electron Lett*, 2002, **38**(24): 1581-1583.
- [2] TUCKER R S, KU P C, and CHANG-HASNAIN C J. Slow-light optical buffers: capabilities and fundamental limitations

- [J]. *J. Lightwave Technol*, 2005, **23**(12): 4046-4066.
- [3] HAU LV, DUTTON S E, BEHROOZI C H. Light speed reduction to 17metres per second in an ultracold atomic gaps [J]. *Nature*, 1999, **397**(18): 594-5978.
- [4] KU P C, SEDGWICH F, CHANG-HASNAIN C J, *et al*. Slow light in semiconductor quantum wells[J]. *Opt Lett*, 2004, **29**(19): 2291 - 2293.
- [5] OKAWACHI Y, BIGELOW M S, SHARPIG J E, *et al*. Tunable all-optical delays via brillouin slow light in an optical fiber [J]. *Phys Rev Lett*, 2005, **94**(15): 153902.
- [6] VLASOV Y A, BOYLE M O, HAMANN H F, *et al*. Active control of slow light on a chip with photonic crystal waveguides [J]. *Nature*, 2005, **438**(3): 65-69.
- [7] GERSEN H, KARLE T J, ENGELEN R J P, *et al*. Real-space observation of ultraslow light in photonic crystal waveguides [J]. *Phys Rev Let*, 2005, **94**(7): 073903.
- [8] CHEN Wei-zong, SHEN Ying, HU Man-li, *et al*. Structure of Basic Period of One-Dimensional Photonic Crystal and the Characters of Forbidden Bands. [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2001, **30**(12): 1453-1456.
陈慰宗, 申影, 忽满利, 等. 一维光子晶体的基本周期结构及其禁带特征 [J]. *光子学报*, 2001, **30**(12): 1453-1456.
- [9] CUI Ying-liu, CAI Xiang-bao, The Properties of Defect States of the Multi Periods of Photonic Crystal [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(6): 704-707.
崔应留, 蔡祥宝. 缺陷态复周期光子晶体特性研究 [J]. *光子学报*, 2004, **33**(6): 704-707.
- [10] OUYANG Zheng-biao, LI Jing-zhen. Short-wavelength three-dimensional photonic crystal [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2000, **20**(2): 112-116.
欧阳征标, 李景镇. 短波长三维光子晶体 [J]. *光子学报*, 2000, **20**(2): 112-116.
- [11] HUANG S C, KATO M, KURAMOCHI E, *et al*. Time-domain and Spectral-domain investigation of inflection-point slow-light modes in photonic crystal coupled waveguides [J]. *Opt Express*, 2007, **15**(6): 3543-3549.
- [12] LI C H, TIAN H P, ZHENG C, *et al*. Improved line defect structures for slow light transmission in photonic crystal waveguide [J]. *Opt Commun*, 2007, **279**(1): 214-218.
- [13] YARIV A, XU Y, LEE R K, *et al*. Coupled-resonator optical waveguide: a proposal and analysis [J]. *Opt Lett*, 1999, **24**(11): 711-713.
- [14] OZBAY E, BAYINDIR M, BULU I, *et al*. Investigation of localized coupled-cavity modes in two-dimensional photonic bandgap structures [J]. *IEEE J Quantum Electronics*, 2002, **38**(7): 837-843.
- [15] ALTUGA H, VUCKOVIC J. Two-dimensional coupled photonic crystal resonator arrays[J]. *Appl Phys Lett*, 2004, **84**(2): 161-163.
- [16] DU Xiao-yu, ZHENG Wan-hua, REN Gang, *et al*. Slow wave effect of 2-D photonic crystal coupled cavity array[J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, **57**(1): 274-278.
- [17] LI Chang-hong, TIAN Hui-ping, LIU Bin, *et al*. Wide-band transmission of slow light in one-dimesional photonic crystal coupled resonator optical waveguide [C]. *SPIE*, 2007. **6782**:

- 678212.
- [18] FENG Li-Juan, JIANG Hai-tao, LI Hong-qiang, *et al.* The dispersion characteristics of impurity bands in coupled resonator optical waveguides of photonic crystal [J]. *Acta Physica Sinica*, 2005, **54**(5):2102-2105.
- [19] JOHNSON S G, JOANNOPOULOS J D. Block-iterative frequency-domain methods for Maxwell's equations in a planewave basis [J]. *Opt Express*, 2001, **8**(3):173-189.
- [20] GUO S P, ALBIN S. Numerical techniques for excitation and analysis of defect modes in photonic crystals [J]. *Opt Express*, 2003, **11**(9):1080-1089.
- [21] SHE Shou-Xian, Physical principles of waveguide optics [M]. Beijing: Northern Jiaotong University Press, 2002. 余守宪, 光波导的物理特性 [M]. 北京: 北方交通大学出版社, 2002.
- [22] MARTINEZ A, GARCIA A, SANCHIS P, *et al.* Group velocity and dispersion model of coupled-cavity waveguides in photonic crystals [J]. *JOSA A*, 2003, **20**(1):147-150.

Investigation on Structure Properties of Slow Light in Photonic Crystal Coupled Resonator Optical Waveguide

LI Chang-hong¹, TIAN Hui-ping², LU Hui², JI Yue-feng²

(1 School of Automation Engineering, Qingdao University, Qingdao, Shandong 266000, China)

(2 Key Laboratory of Optical Communication & Lightwave Technologies, Ministry of Education, Beijing University of Posts & Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract: The significant effect factor of slow light transmission in photonic crystal coupled resonator optical waveguide is investigated. The change tendency of guided mode band, group velocity and group delay with the tuning of distance between neighboring cavities are discussed. The guided mode is flattened clearly and the group velocity decreases sharply with the increasing of cavities distance. When the interval between contiguous cavities is 7 lattice constants of photonic crystal, the ultra small group velocity below $2 \times 10^{-4} c$ is obtained. This is roughly two orders of magnitude smaller than that in line defect PC waveguide. The maximal group delay through CROW of $13.23 \mu\text{m}$ with supercell 7×7 exceeds 400 ps, which are four orders of magnitude larger than that in traditional waveguide with the same length.

Key words: Photonic crystals; Cavity; Waveguide; Slow light



LI Chang-hong was born in 1973. She is a Ph. D. degree candidate at Beijing University of Posts & Telecommunications. Currently, she is a lecture at Qingdao University, and her research interests mainly focus on photonic crystals and optical communication.